Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography
Vol. 34, No. 3, 243-251, 2016
http://dx.doi.org/10.7848/ksgpc.2016.34.3.243

ISSN 1598-4850(Print)
ISSN 2288-260X(Online)
Original article

점군집 데이터를 이용한 곡면객체 모델링 및 정확도 분석

Curved Feature Modeling and Accuracy Analysis Using Point Cloud Data

이대건[1] · 유은진[2] · 이동천[3]
Lee, Dae Geon · Yoo, Eun Jin · Lee, Dong-Cheon

Abstract

LiDAR data processing steps include noise removal, filtering, classification, segmentation, shape recognition, modeling, and quality assessment. This paper focuses on modeling and accuracy evaluation of 3D objects with curved surfaces. The appropriate modeling functions were determined by analyzing surface patch shape. Existing methods for modeling curved surface features require linearization, initial approximation, and iteration of the non-linear functions. However, proposed method could directly estimate the unknown parameters of the modeling functions. The results demonstrate feasibility of the proposed method. The proposed method was applied to the simulated and real building data of hemi-spherical and semi-cylindrical surfaces. The parameters and accuracy of the modeling functions were estimated. It is expected that the proposed method would contribute to automatic modeling of various objects.

Keywords : Laser Scanner, Point Clouds, Geometric Surfaces, Surface Functions, Modeling Accuracy

초 록

일반적으로 라이다 데이터 처리 과정은 노이즈 제거, 지표면/비지표면 분리를 위한 필터링, 데이터 분류, 객체분할, 형태인식, 객체 모델링, 성과물에 대한 정확도 검증 등이다. 본 논문은 점군집 라이다 데이터를 이용한 3차원 곡면객체의 모델링과 정확도 검증에 중점을 두고 있다. 기존의 구형 및 원통형 객체 모델링 방법은 함수의 선형화, 미지계수의 초기 근사값 및 반복 계산이 요구되지만, 제안한 방법은 모델링 함수의 미지계수를 직접 결정하는 방법이다. 이를 위하여 객체를 형성하는 단위 객체면 형태를 분석하여 적합한 함수를 결정하고, 함수를 구성하는 미지변수를 추정한 후 정확도를 분석하여 타당성을 검증하였다. 제안한 방법을 반구형 및 반원통의 시뮬레이션 및 실제 건물 데이터에 적용하여 모델링 함수의 계수와 정확도를 산정하였으며, 다양한 형태의 객체 모델링의 자동화에 기여할 것으로 판단된다.

핵심어 : 레이저 스캐너, 점군집 데이터, 기하학적 곡면 함수, 모델링 정확도

1. 서 론

레이저 스캐너 기술은 본격적으로 상용화되기 시작한 2000년대 초반부터 지속적으로 활용분야가 확대되고 있다. 레이저 스캐너, GPS(Global Positioning System) 및 IMU(Inertial Measurement Unit)로 높은 정확도의 고밀도 3차원 좌표를 제공하는 라이다 데이터를 다량으로 획득할 수 있는 장점이 있지만, 불규칙하게 분포된 점들의 위상관계와 시각적 정보가 결여되어 있으므로 다양한 종류의 결과물을 생성하기 위해서 복잡한 과정이 요구된다(Brenner, 2010; Lim *et al*., 2009; Wie *et al*., 2011). 항공 라이다 데이터 처리는 시스템 캘리브레이션, 센서 데이터 융합, 스트립 조정, 노이즈 제거, 지면 및 비지면 분리, 분류 및 분할, 객체 모델링, 정확도 분석 등으로 이루어진다.

Received 2016. 02. 17, Revised 2016. 03. 04, Accepted 2016. 05. 03
1) Member, Department of Geoinformation Engineering, Sejong University (E-mail: dglee@sju.ac.kr)
2) Member, Department of Geoinformation Engineering, Sejong University (E-mail: eunjinyoo@sju.ac.kr)
3) Corresponding Author, Member, Department of Geoinformation Engineering, Sejong University (E-mail: dclee@sejong.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

지형지물의 기하학적 특성을 추출하여 객체의 형태를 인식하고 재구현하기 위한 모델링을 수행하기 위해서는 객체를 구성하는 단위면에 존재하는 점군집 좌표를 이용하여 면의 형태를 묘사할 수 있는 방법이 필요하다(Filin and Pfeifer, 2006; Habib *et al*., 2009; Habib *et al*., 2010; Lee and Lee, 2014; Park *et al*., 2012; Vosselman, 2000). 단위면을 분할하여 객체를 모델링하는 많은 연구가 수행되어 왔으며, 대부분의 방법은 영상처리, 컴퓨터비전, 객체인식 등 영상을 기반으로 한 기법을 사용하기도 하지만, 라이다 데이터 특성에 특화된 방법도 시도되고 있다. 그러나 아직까지 표준적인 방법은 구현되지 않고 있다(Douillard *et al*., 2011; Moosmann *et al*., 2009; Park *et al*., 2012; Wang and Shan, 2009).

도심지역의 건물 모델링은 정밀 정사영상을 제작하기 위해 필수적이다. 분할된 데이터를 이용하여 객체들을 최적의 수학적 함수로 모델링한 결과의 정확도는 성과물의 품질을 좌우한다(Al-Durgham and Habib, 2013; Park *et al*., 2012; Yoo *et al*., 2013). 건물 모델링에 관한 많은 연구들은 지붕이 평면으로 구성된 건물들을 대상으로 하거나, 평면으로 가정하고 있다. 그러나 실제 건물의 모양은 다양한 형태이므로, 단순 평면뿐 아니라 여러 모양의 곡면객체에 대한 세밀도와 정확도가 높은 모델링이 요구된다. 최근에는 라이다 데이터를 이용하여 구형 및 원통형 건물, 가로등 및 전신주, 공장 또는 발전소의 파이프 라인, 곡면 중력댐 등 곡면 형태의 시설물 및 구조물의 모델링에 관한 연구가 진행되고 있다. 이와 같은 객체들은 비선형 곡면 함수를 이용하여 모델링을 수행한다(Akel *et al*., 2009; Moosmann *et al*., 2009). 원통은 단순한 기하학적 형태이지만, 임의의 위치에 존재하는 원통의 길이, 반경 및 회전 요소를 결정하기 위해서는 관측 방정식을 도출하여야 한다(Eberly, 2015; Mulat *et al*., 2008).

대부분의 비선형 곡면 함수에 의한 객체 모델링은 모델링 함수의 선형화와 미지변수의 초기 근사값이 요구되며, 수렴조건을 만족할 때까지 반복 수행하여 미지변수의 해를 추정하지만, 본 논문에서는 비선형 곡면 모델링 함수의 미지변수를 직접 결정하는 방법을 제안하고 시뮬레이션과 실제 라이다 데이터에 적용하여 정확도와 타당성을 검증하였다. 연구는 다음과 같은 순서로 수행하였다: (1)곡면의 기하학적 특성 추출, (2)곡면형태 분석에 의한 최적 함수 결정, (3)모델링 함수의 미지변수 결정, (4)정확도 분석.

2. 객체형태 분석

복잡한 구조로 이루어진 물질도 최소 기본 단위인 분자나 원자는 단순한 형태인 것처럼, 다양한 모양의 지형지물도 단순한 형태의 기본 단위면들의 조합으로 구성되어 있다. 하나의 단위면을 구성하는 데이터는 동일하거나 유사한 기하학적 특성을 가지고 있어야 하며, 인접한 단위면들의 특성과 명확하게 구분할 수 있어야 한다(Pratt, 2001). 라이다 데이터는 객체 표면이 수 많은 3차원 좌표로 구성되어 있으므로 면에 대한 기하학적 특성을 추출하고 이를 이용하여 객체의 형상을 인식할 수 있다. 단위면의 기하학적 형태는 단순한 평면이거나 다양한 모양의 곡면으로 구분될 수 있다.

객체를 구성하는 면의 형태를 결정하는 중요한 요소는 기울기이며, 평면은 경사도에 따라 완전 평면과 사면으로 구분되며, 곡면은 곡률과 경사 변화 및 경사 방향의 분포에 따라 다양한 종류로 구별된다. 3차원 공간에서 객체 면의 경사 및 곡률은 X와 Y 성분으로 분리되며, 이 성분들의 조합에 따라 다양한 모양의 객체가 형성되고 객체를 구성하는 단위면들은 최적의 3차원 수학적 함수로 모델링할 수 있다. 육안에 의존하지 않고 3차원 점의 좌표 데이터를 이용하여 객체의 형상을 자동으로 인식하기 위해서는 객체의 기하학적 특성 요소를 추출하고 형태를 분석할 수 있어야 한다.

객체들은 단위면으로 구성되어 있으므로 모양과 특징을 결정하는 요소들은 형태 서술자 및 공간영역 또는 매개변수 영역에 따라 다양한 방법으로 추출할 수 있다. 공간영역에서는 객체를 구성하는 면의 경사도 및 경사 방향, 곡률의 크기 및 변화, 분포 특성 등을 기반으로 객체의 형태를 분석하는 방법이며, 매개변수 영역에서는 Hough 변환과 같이 매개변수를 기반으로 객체의 특성을 결정하는 방법이다(Rabbani and van den Heuvel, 2005). 또한 데이터 처리방법은 상향식과 하향식 방식이 있으며, 이 두 방식을 혼합한 하이브리드 방법이 있다(Moosmann *et al*., 2009).

본 논문에서는 공간영역에서 3차원 점군집 좌표 데이터를 이용하여 상향식으로 객체 면의 형태를 분석하여 이에 적합한 곡면 방정식을 결정하였으며, 모델링 정확도를 산정하기 위하여 추정한 미지변수의 MSE(Mean-Square-Error of parameters)와 함수로 결정된 면과 3차원 점군집 좌표간의 일치성을 나타내는 $RMSE_Z$(Root-Mean-Square-Error of Z coordinates)를 계산하였다.

3. 곡면객체 모델링

곡면의 형태는 다양하고 복잡하며, 대표적인 곡면으로는 구, 원통, 타원체, 원추, 원환체, 쌍곡면체 등이 있다. 객체의 기하학적 형태를 결정하는 중요한 요소는 객체를 구성하는 면

의 경사이다. 완전 평면의 경사벡터는 "0" 이며, 경사도에 따라 크기와 방향이 다르다. 경사 평면과 원통면의 경사벡터는 유사하지만, 경사평면의 경사벡터의 크기는 일정하고, 원통면의 경우는 중심에서 바깥쪽으로 갈수록 경사벡터의 크기가 증가한다. 또한 구면과 원통면은 경사벡터의 분포 특성이 다르므로 두 객체의 형태를 서로 구별할 수 있다. 구면의 경사벡터는 여러 방향으로 방사적 형태로 균등하게 분포하는 반면, 원통면의 경사벡터는 2개의 경사방향이 대칭적으로 양분된다. 또한 경사벡터는 축척과 회전 및 이동과 같은 기하학적 변화에 불변해야 하는 scale, rotation and translation invariant 특성을 가지고 있다.

본 논문에서는 반구와 반원통형 지붕을 모델링하기 위하여 최적의 3차원 곡면 방정식의 미지변수를 직접 추정하는 방법을 적용하였다. 원통은 단순한 형태이지만 원통을 결정하는 수학적 함수는 다른 곡면 방정식(예: 구, 타원체, 고차 다항식, 조화함수 등)과는 다르게 하나의 식으로 표현할 수 없다. 구와 원통은 비선형 함수이므로 모델링에 필요한 미지변수를 구하기 위해서 함수의 선형화가 필요하고, 미지수들의 초기 근사값을 미리 추측하고 수렴조건을 만족할 때까지 반복 계산을 수행하여 미지변수의 해를 결정하게 된다(Su and Bethel, 2010; Tran *et al*., 2015; Yoo *et al*., 2014).

본 논문에서는 함수의 선형화와 미지변수들의 초기 근사값 없이 직접 해를 구하여 모델링하는 방법을 적용하였다. 이와 같이 비선형 함수의 미지변수의 해를 직접 구하는 방법은 비선형 방정식인 similarity와 affine 좌표 변환식에서도 적용되고 있다. 즉 선형화하는 대신 비선형 변수들을 새로운 매개변수로 치환하여 선형식으로 변환하여 직접 미지변수의 해를 구할 수 있다.

3.1 구면 객체 모델링

구는 중심좌표와 중심으로부터 곡면까지 거리인 반지름으로 정의된다. 일반적으로 구의 방정식을 미지변수로 1차 편미분한 항으로 선형화하고, 중심좌표와 반지름의 초기 근사값을 이용하여 수렴할 때까지 반복 계산한다. 그러나 비선형 방정식의 미지변수를 선형 매개변수로 치환하여 해를 직접 구할 수 있다.

(1) 직접 해를 위한 구의 방정식

구의 표준 방정식은 Eq. (1)과 같다.

$$(X-a)^2 + (Y-b)^2 + (Z-c)^2 = r^2 \quad (1)$$

where *(X, Y, Z)* are coordinates of the point clouds, *(a, b, c)* are center coordinates and *r* denotes radius of the sphere.

표준 방정식을 새로운 매개변수 $p_1 = -2a$, $p_2 = -2b$, $p_3 = -2c$, $p_4 = a^2+b^2+c^2-r^2$로 치환하면, Eq. (2)와 같은 일반식으로 표현할 수 있다.

$$X^2 + Y^2 + Z^2 + p_1X + p_2Y + p_3Z + p_4 = 0 \quad (2)$$

매개변수를 새로운 미지변수로 치환한 관측 방정식은 Eq. (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} -(X_1^2+Y_1^2+Z_1^2) \\ -(X_2^2+Y_2^2+Z_2^2) \\ \vdots \\ -(X_n^2+Y_n^2+Z_n^2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

관측 방정식을 Eq. (4)로 표현하고, 오차벡터 e 가 최소가 되는 미지변수의 해 ξ 를 Eq. (5)로부터 구할 수 있다.

$$Y = A \cdot \xi + e \quad (4)$$

$$\hat{\xi} = (A^T A)^{-1} \cdot (A^T Y) \quad (5)$$

where Y represents observation vector, A is design matrix, ξ is unknown parameter vector and e is error vector.

최종적으로 구의 중심좌표*(a, b, c)*와 반지름*(r)*을 미지변수와 매개변수와의 관계식인 Eq. (6)과 Eq. (7)로부터 구할 수 있다.

$$a = -\frac{p_1}{2}, \quad b = -\frac{p_2}{2}, \quad c = -\frac{p_3}{2} \quad (6)$$

$$r = \sqrt{\left(\frac{p_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{p_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{p_3}{2}\right)^2 - p_4} \quad (7)$$

(2) 미지변수 및 모델링 정확도

추정한 구의 중심좌표와 반지름의 MSE(MSE of parameters)와 모델링 함수에 의해 결정된 구면의 *Z* 좌표와 라이다 데이터의 *Z* 좌표들간의 잔차로부터 RMSE를 계산하여 모델링 정확도(RMSE of fitting model)를 평가할 수 있다. *a, b* 및 *c*의 분산(dispersion)은 미지변수와 매개변수와의 관계를 이용하여 Eq. (8)에 의해서 구할 수 있다.

$$D\{a\} = \frac{1}{4} D\{p_1\}, \quad D\{b\} = \frac{1}{4} D\{p_2\}, \quad D\{c\} = \frac{1}{4} D\{p_3\} \quad (8)$$

또한, 미지변수 r의 분산은 매개변수 p_4와 r의 관계인 $p_4=a^2+b^2+c^2-r^2$ 으로부터 Eq. (9)와 같이 계산할 수 있다.

$$D\{dr\} = \begin{bmatrix} \frac{p_1}{4r} & \frac{p_2}{4r} & \frac{p_3}{4r} & -\frac{1}{2r} \end{bmatrix} \cdot D\left\{ \begin{bmatrix} dp_1 \\ dp_2 \\ dp_3 \\ dp_4 \end{bmatrix} \right\} \cdot \begin{bmatrix} \frac{p_1}{4r} & \frac{p_2}{4r} & \frac{p_3}{4r} & -\frac{1}{2r} \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

미지변수의 분산성분(variance component: $\hat{\sigma}_0$)과 정확도는 Eq. (10)과 Eq. (11) 및, Eq. (12)로부터 구할 수 있다.

$$\tilde{e} = Y - A \cdot \hat{\xi} \quad (10)$$

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{\tilde{e}^T \cdot \tilde{e}}{n-m}} \quad (11)$$

$$MSE_b = \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{D\{b\}}, \quad MSE_c = \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{D\{c\}} \quad (12)$$

where $\hat{\sigma}_0$ denotes variance component. n and m are number of points and number of unknown parameters, respectively.

모델링 정확도는 추정한 미지변수로 구성된 구의 방정식과 라이다 데이터의 Z 좌표간의 잔차를 Eq. (13)으로 계산하고, Eq. (14)에 의하여 Z 좌표에 대한 RMSE를 구한다.

$$v = \sqrt{|\, r^2 - (X-a)^2 - (Y-b)^2 \,|} + c - Z \quad (13)$$

$$RMSE_Z = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n}} \quad (14)$$

where v denotes residual of Z coordinates.

3.2 원통 객체 모델링

임의의 위치에 임의의 각도로 회전된 원통을 함수로 표현하기 위해 필요한 미지변수는 여러 방법으로 정의될 수 있지만, 기본적으로 축의 위치와 회전각, 반경 및 길이에 의해서 결정된다. 축의 위치는 축 양단의 좌표로 결정되며, 회전각은 수평각과 고도각으로 이루어져 있으며, 반경은 축에서 원통면까지의 법선 길이다.

(1) 원통의 회전각 결정

회전각은 원통의 기하학적 특성에 의하여 다음과 같은 과정으로 결정할 수 있다:

① 원통면상의 모든 점에서 4방향에 대해서 경사를 구한다.

X축 양의 방향 경사: $S_1 \rightarrow S_{X(+)}$
X축 음의 방향 경사: $S_2 \rightarrow S_{X(-)}$
Y축 양의 방향 경사: $S_3 \rightarrow S_{Y(+)}$
Y축 음의 방향 경사: $S_4 \rightarrow S_{Y(-)}$

4개의 방향에 대하여 경사를 계산하는 이유는 원통이 임의의 각도로 회전되어 있는 경우에도 회전에 불변하게 추정하기 위함이다.

② 4개 방향에 대한 경사의 합이 임계값보다 작은 점들을 Eq. (15)로부터 추출한다.

$$\underline{P} \supset \{p_n = \sum_{i=1}^{4} |\, S_i \,| \le \varepsilon\} \quad (15)$$

where $\underline{P}$ represents extracted point set, n is number of points, S is slope, and ε denotes threshold slope value.

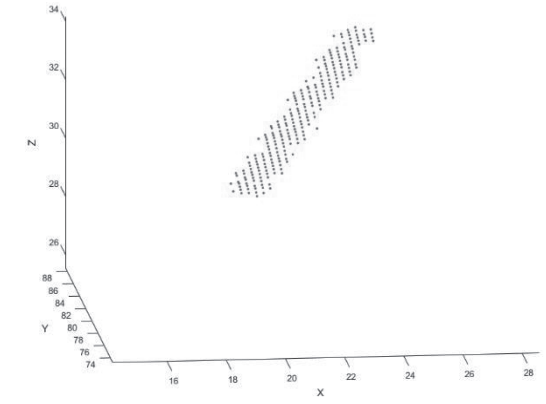
반지름이 일정한 원통의 경우, 축을 수직으로 지나는 평면과 원통면과 만나는 직선상에서 4방향에 대한 경사의 합은 이 직선상에서 동일하며 최소가 된다. 그러므로 경사의 합이 최소인 점만을 추출하면 원통의 축이 원통면에 수직으로 투영된 직선과 일치한다. 그러나 라이다 데이터는 노이즈가 포함되어 있으며, 실제 원통면은 수학적으로 완전한 원통이 아닐 수 있으므로 경사의 합이 최소인 점만을 추출하여 원통의 축을 결정하면 실제 축을 정확하게 추정할 수 없다. 그러므로 경사의 합이 최소인 값을 중심으로 일정한 범위 내에 포함되는 점들을 이용하여 원통의 회전을 추정하는 것이 타당하다.

③ Fig. 1(a)는 ②에서 설명한 방법으로 추출된 점들을 보여주고 있으며, 추출된 점들을 X-Y 평면(Fig. 1(b) 참조), X-Z 평면(Fig. 1(c) 참조) 및 Y-Z 평면(Fig. 1(d) 참조)에 투영한 후, 이 점들을 이용하여 선형회귀를 수행하여 각 각의 평면에 투영된 직선의 식을 구한다. 선형회귀에 의한 직선의 방정식은 Eq. (16)과 같으며, 직선의 계수를 구하기 위한 관측방정식은 Eq. (17)과 같다.

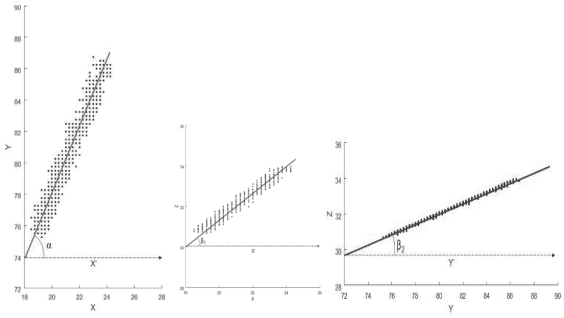
$$Y = k_1 X + k_2 \quad (16)$$

where (X, Y) are projected coordinates of the point clouds, k_1 is slope and k_2 is intercept.

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & 1 \\ X_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ X_n & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \quad (17)$$



(a) Extracted points in 3D space



(b) X-Y plane (c) X-Z plane (d) Y-Z plane

Fig. 1. Extracted points and regression lines using points projected to 2D planes

④ 원통의 2개 회전각 성분 중 수평각*(α)*은 Fig. 2에서 보여주는 것처럼 *X-Y* 평면에 투영된 각이므로 Eq. (18)로 결정된다.

$$\alpha = tan^{-1}(k_1) \quad \text{in } X\text{-}Y \text{ plane} \tag{18}$$

⑤ 고도각*(β)*은 *X-Y* 평면이 기준이다. *X-Y* 평면에 투영된 수평각과는 다르게 고도각은 수평각이 0°와 180°인 경우에는 *X-Z* 평면에서 직선을 결정할 수 있으며, 수평각이 90°와 270°인 경우에는 *Y-Z* 평면에서 직선을 결정할 수 있다. 또한 수평각이 45°, 135°, 225° 및 315°인 경우를 제외하면, *X-Z*와 *Y-Z* 평면에 투영되는 직선의 기울기는 서로 다르다. 그러므로 임의의 수평각에서 3차원 직선의 고도각은 두 평면(*X-Z* 또는 Y-Z)에 투영된 직선의 각도(β_1 또는 β_2)를 Eq. (19)와 Eq. (20)으로부터 구할 수 있다.

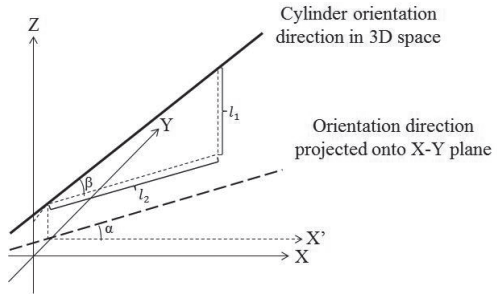


Fig. 2. Determination of cylinder orientation

$$\beta_1 = tan^{-1}(k_1) \quad \text{in } X\text{-}Z \text{ plane} \tag{19}$$

$$\beta = tan^{-1}(\, tan\beta_1 \cdot cos\alpha \,) \tag{20}$$

⑥ 추정한 회전각에 대한 분산성분 및 MSE는 Eq. (21)과, Eq. (22)로부터 구할 수 있다

$$\hat{\sigma}_{\alpha 0} = \sqrt{\frac{\tilde{e}^T \cdot \tilde{e}}{n-m}} \tag{21}$$

$$MSE_{k_i} = \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{D\{k_1\}}, \quad MSE_\alpha = tan^{-1}(MSE_{k_1}) \tag{22}$$

(2) 직접 해를 위한 원의 방정식

원통을 이루는 원의 방정식을 구와 같은 방법으로 치환 매개변수를 사용하여 관측 방정식으로 나타내면 Eq. (23)과 같다.

$$\begin{bmatrix} -(Y_1^2 + Z_1^2) \\ -(Y_2^2 + Z_2^2) \\ \vdots \\ -(Z_n^2 + Z_n^2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & Z_1 & 1 \\ Y_2 & Z_2 & 1 \\ & \vdots & \\ Y_n & Z_n & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \tag{23}$$

치환 매개변수 p_1과 p_2는 앞에서 설명한 구의 방정식과 동일하며 원의 방정식의 경우, $p_3 = a^2 + b^2 - r^2$이다. 그러므로 원통의 중심좌표와 반지름은 Eq. (24), Eq. (25) 및 Eq. (26)으로부터 구할 수 있다.

$$a = -\frac{p_1}{2} \tag{24}$$

$$b = -\frac{p_2}{2} \tag{25}$$

$$r = \sqrt{\left(\frac{p_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{p_2}{2}\right)^2 - p_3} \tag{26}$$

(3) 미지변수 및 모델링 정확도

원통면도 구면 모델링의 경우와 같이 추정한 원통의 미지변수 정확도와 모델링 정확도를 구하였다. 미지변수인 *a, b, r* 과 치환 매개변수인 p_1, p_2, p_3의 관계로부터 원통의 중심좌표와 반지름에 대한 정확도는 Eq. (27)과 Eq. (28)에 의해서 구할 수 있다.

$$D\{a\} = \frac{1}{4} D\{p_1\}, \quad D\{b\} = \frac{1}{4} D\{p_2\} \tag{27}$$

$$D\{r\} = \begin{bmatrix} \frac{p_1}{4r} & \frac{p_2}{4r} & -\frac{1}{2r} \end{bmatrix} \cdot D\left\{ \begin{bmatrix} dp_1 \\ dp_2 \\ dp_3 \end{bmatrix} \right\} \cdot \begin{bmatrix} \frac{p_1}{4r} & \frac{p_2}{4r} & -\frac{1}{2r} \end{bmatrix}^T \tag{28}$$

그러므로 미지변수의 분산성분 및 정확도는 Eq. (29)와 Eq. (30)으로부터 계산된다.

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{\tilde{e}^T \cdot \tilde{e}}{n-m}} \tag{29}$$

$$MSE_a = \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{D\{a\}}, \quad MSE_b = \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{D\{b\}}, \quad MSE_r = \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{D\{r\}} \tag{30}$$

모델링 정확도는 추정한 미지변수로 구성된 원통 방정식과 관측 데이터의 *Z* 좌표와의 잔차를 계산하고, Eq. (31)과 Eq. (32)에 의하여 *Z* 좌표에 대한 RMSE를 구할 수 있다.

$$v = \sqrt{|\, r^2 - (Y-a)^2 \,|} + b - Z \tag{31}$$

$$RMSE_Z = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n}} \tag{32}$$

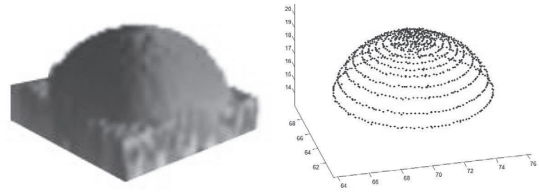
4. 결과 및 분석

제안한 방법의 타당성과 모델링 정확도를 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 실제 항공 라이다 데이터(Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6 참조)에 적용하였다. 시뮬레이션 데이터를 사용하면 모델링 함수의 미지변수의 정확한 값을 알고 있으며, 노이즈 레벨, 객체의 크기, 회전 및 형태 등 다양한 조건을 부여할 수 있기 때문에 제안한 방법의 객관적인 검증과 분석이 용이하다. 모델링 결과와 정확도는 Table 1, Table 2, Table 3 및 Table 4에 제시하였다.

4.1 모델링 결과

(1) 시뮬레이션 반구면 데이터

반구면은 돔 지붕의 전형적인 형태를 시뮬레이션 한 데이터이다(Fig. 3 참조). 점들간의 평균 간격인 GSD(GSD; Ground Sampling Distance)는 0.25m이고, *Z* 좌표에 ±0.15m의 무작위 오차를 부여하였다.



(a) Dome roof DSM (b) LiDAR point clouds

Fig. 3. Simulated LiDAR data of hemi-spherical surface

Table 1. Estimated parameters and accuracy of hemi-spherical surface for simulated data

Parameter	a (m)	b (m)	c (m)	r (m)	$\hat{\sigma}_0$	$RMSE_Z$ (m)
Estimation	70.00	65.01	15.00	5.01	0.24	0.06
True value	70.00	65.00	15.00	5.00		
Difference	0.00	0.01	0.00	0.01		
MSE of parameter	0.002	0.002	0.003	0.002		

(2) 실제 반구면 데이터

반구형 상부구조물을 가지고 있는 국회의사당 건물(NAB)과 라이다 데이터를 보여주고 있으며(Fig. 4 참조), GSD는 0.25m이고, 데이터 획득에 사용된 Optech ALTM Gemini의 *Z* 좌표 정확도 범위는 0.05m~0.30m이다.

(a) National Assembly Building (NAB) (b) LiDAR point clouds

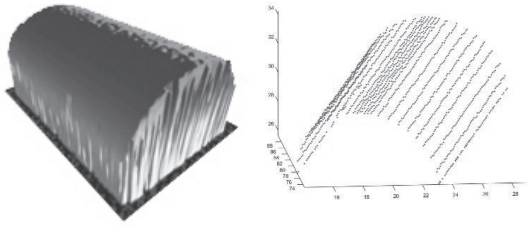
Fig. 4. Real LiDAR data of hemi-spherical surface

Table 2. Estimated parameters and accuracy of hemi-spherical surface for real data

Parameter	a (m)	b (m)	c (m)	r (m)	$\hat{\sigma}_0$	$RMSE_Z$ (m)
Estimation	192411.98	448047.89	79.21	34.06	7.85	0.16
MSE of parameter	0.001	0.001	0.004	0.003		

(3) 시뮬레이션 반원통면 데이터

시뮬레이션 반원통 데이터의 사양(GSD 및 노이즈 범위)은 반구면 데이터와 동일하다(Fig. 5 참조). 반원통 형태의 지붕은 체육관, 강당 및 창고 등과 같은 건물에서 흔히 볼 수 있다.



(a) Arch roof DSM (b) Point clouds

Fig. 5. Simulated LiDAR data of half-cyliner surface

Table 3. Estimated parameters and accuracy of half-cylindrical surface for simulated data

(a) Estimated parameters and accuracy of rotation angle

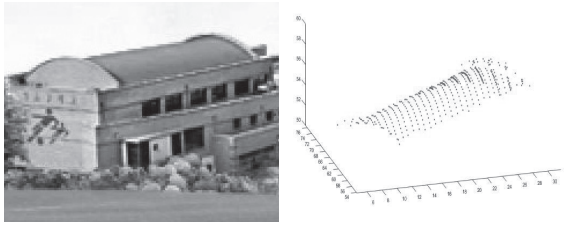
Parameter	α (°)	β (°)	$\hat{\sigma}_{\alpha 0}$	$\hat{\sigma}_{\beta 0}$
Estimation	65.23	15.02	1.61	0.15
MSE of parameter	0.477	0.044		
True value	65.00	15.00		
Difference	0.23	0.02		

(b) Estimated parameters and accuracy of circle equation

Parameter	a (m)	b (m)	r (m)	$\hat{\sigma}_0$	$RMSE_Z$ (m)
Estimation	14.67	4.97	5.00	0.24	0.13
True value	15.00	5.00	5.00		
Difference	0.33	0.03	0.00		
MSE of parameter	0.001	0.002	0.002		

(4) 실제 반원통면 데이터

반원통형 지붕을 가지고 있는 동탄지역에 위치한 초등학교 강당의 라이다 데이터를 보여주고 있으며(Fig. 6 참조), 레이저 스캐너와 데이터 사양은 NAB 데이터와 동일하다. Table 4(b)에서 중심좌표*(a, b)*는 *Y-Z* 평면에 투영한 원통의 중심좌표이므로 *a*는 중심의 *Y* 좌표값을 *b*는 *Z* 좌표값을 나타낸다.



(a) Arch roof auditorium (b) LiDAR point clouds

Fig. 6. Real LiDAR data of half-cylinerical surface

Table 4. Estimated parameters and accuracy of half-cylindrical surface for real data

(a) Estimated parameters and accuracy of rotation angle

Parameter	α (°)	β (°)	$\hat{\sigma}_{\alpha 0}$	$\hat{\sigma}_{\beta 0}$
Estimation	33.60	-0.02	2.94	0.13
MSE of parameter	0.557	0.04		

(b) Estimated parameters and accuracy of circle equation

Parameter	a (m)	b (m)	r (m)	$\hat{\sigma}_0$	$RMSE_Z$ (m)
Estimation	410844.30	46.91	8.23	3.49	0.23
MSE of parameter	0.031	0.241	0.228		

4.2 정확도 분석

객체 모델링은 지형지물의 기하학적 형태, 특성 및 위치를 정확하게 재현할 수 있어야 하므로, 모델링 결과에 대한 정확도 분석과 평가는 중요한 과정이다. 일반적으로 모델링 결과의 정확도는 수치지형도의 도화규정 및 정확도 기준을 기반으로 추정한 모델링 함수의 매개변수의 정확도와 모델링 함수와 데이터간의 차이를 분석하여 검증하고 있다. 시뮬레이션 데이터는 정확한 실제값을 알고 있으므로, 추정한 모델링 함수의 미지변수 및 모델링 결과와 실제값의 절대적 차이를 계산할 수 있지만, 실제 데이터는 정확한 값을 알기 어려우므로 간접적인 방법으로 모델링 함수의 미지변수의 MSE 값으로 정확도를 분석하였다.

반구형인 돔형지붕의 경우, 시뮬레이션 데이터에서는 거의 오차없이 모델링이 수행되었고, 전체적인 모델링 정확도를 나타내는 높이 좌표에 대한 $RMSE_Z$는 0.06m이었으며, 실제 데이터인 국회의사당 건물에 대해서는 0.16m이었다. 반원통형 지붕의 경우, 시뮬레이션 데이터에서는 $RMSE_Z$가 0.13m

이었으며, 실제 데이터에서는 0.23m이었다. 대다수 국가의 대축척 수치지형도(축척 1/1,000)의 정확도는 신뢰수준 95%에서 RMSE가 0.25m~0.30m이고, 레이저 스캐너의 정확도 범위가 0.05m~0.30m이므로, 제안한 모델링 방법은 타당하다고 판단된다.

반원통형의 모델링 정확도가 반구형 모델링에 비해 낮은 이유는 반원통의 축의 회전각 결정이 다소 부정확하기 때문이다. 즉 축의 결정이 미지변수 *a, b, r*의 정확도에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 주목할 만한 결과는 실제 반원통형의 경우, 중심좌표*(a, b)*가 *a*에 비하여 *b*(즉 *Y-Z* 평면에 투영한 원통 중심의 *Z* 좌표)의 MSE가 큰 이유는 지붕 양끝에 원통면보다 높은 구조물이 포함되었기 때문이다. 즉 이 구조물의 데이터가 지붕면의 높이를 추정하는데 영향을 미치므로 *b*의 분산이 *a*에 비해 크며, 반지름*(r)*의 추정값에도 같은 영향을 미치므로 *r*의 분산값도 크다.

5. 결 론

본 논문에서는 라이다 데이터를 이용하여 곡면객체의 대표적인 형태인 반구와 반원통형 지붕을 모델링하는 방법을 제안하였다. 객체의 면을 묘사할 수 있는 최적의 수학적 함수를 결정하고, 함수의 미지변수를 구함으로써 객체를 모델링할 수 있었다. 비선형 함수로 표현되는 곡면객체 모델링 함수의 미지변수를 직접 구하는 방법을 적용하여, 초기 근사값 및 수렴을 위한 반복계산 없이 모델링을 수행하고 정확도를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

객체면의 경사에 대한 특성 정보는 형태인식의 중요한 요소이며, 3차원 공간에서 경사벡터의 형태와 분포 특성을 분석하여 곡면의 종류와 특징을 파악함으로써 최적의 모델링 함수를 결정할 수 있었다. 대부분의 3차원 도시 모델링 또는 수치지형도 제작을 위한 디지타이징은 지붕의 형태를 평면으로 가정하여 단순화하고 있으며, 특히 곡면 지붕은 특이점이 명확하게 식별되거나 정의되지 않으므로 곡면 함수를 이용하여 다양한 형태의 곡면객체 모델링을 자동화할 수 있었다.

반원통 모델링의 경우 축 결정이 정확도에 영향을 미치므로 객관적이고 일반화할 수 있는 정확도 검증을 위해서는 향후 다양하고 많은 곡면객체에 대한 데이터를 체계적으로 획득하여 모델링을 수행하고 분석할 필요가 있다. 라이다 데이터를 이용한 다양하고 복잡한 건물 모델링은 정밀 정사영상생성, 도시 모델링, 공간정보 플랫폼 등 지형지물 인프라 구축에 효율적으로 활용할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2015년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1D1A1A01056933)

References

Akel, N., Filin, S., and Doytsher, Y. (2009), Reconstruction of complex shape buildings from LiDAR data using free form surfaces, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 75, No. 3, pp. 271–280.

Al-Durgham, M. and Habib, A. (2013), A framework for the registration and segmentation of heterogeneous LiDAR data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 79, No. 2, pp. 135– 145.

Brenner, C. (2010), Building extraction, In: Vosselman, G. and Maas, H.G. (eds), *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 169-212.

Douillard, B., Underwood, J., Kuntz, N., Vlaskine, V., Quadros, A., Morton, P., and Frenkel, A. (2011), On the segmentation of 3D LiDAR point clouds, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 9-13 May, Shanghai, China, pp. 2798-2805.

Eberly, D. (2015), Fitting 3D data with a cylinder, *Geometric Tools, LLC*, http://www.geometrictools.com/Documentation /CylinderFitting.pdf (last date accessed: 2 December, 2015).

Filin, S. and Pfeifer, N. (2006), Segmentation of airborne laser scanning data using a slope adaptive neighborhood, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 60, No. 2, pp. 71–80.

Habib, A., Kersting, A.P., Bang, K.I., and Lee, D.C. (2010), Alternative methodologies for the internal quality control of parallel LiDAR strips, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 48, No. 1, pp. 221–236.

Habib, A., Kim, E., and Kim, C. (2009), Occlusion-based methodology for the classification of the LiDAR data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 75, No. 6, pp. 703-712.

Lee, D. and Lee, D.C. (2014), Strip adjustment of airborne

laser scanner data using area-based surface matching, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 32, No. 6, pp. 625-635.

Lim, S.B., Kim, J., and Lee, D.C. (2009), Automation of building extraction and modeling using airborne LiDAR data, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 27, No. 5, pp. 619-628. (in Korean with English abstract)

Moosmann, F., Pink, O., and Stiller, C. (2009), Segmentation of 3D LiDAR data in non-flat urban environments using a local convexity criterion. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 3-5 June, Xi'an, China, pp. 215–220.

Mulat, C., Donias, M., Baylou, P., Vignoles, G., and Germain, C. (2008), Optimal orientation estimators for detection of cylindrical objects, *Signal, Image and Video Processing*, Vol. 2, No. 1, pp. 51–58.

Park, S., Yoo, E., Lee, D.C., and Lee Y. (2012), 3D shape descriptor for segmenting point cloud data, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 30, No. 6, pp. 643-651.

Pratt, W. (2001), Digital Image Processing 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York, NY, 735p.

Rabbani, T. and van den Heuvel, F. (2005), Efficient Hough transform for automatic detection of cylinders in point clouds, *ISPRS Workshop Laser Scanning*, 12-14 September, Enschede, the Netherlands, pp.60-65.

Su, Y.T. and Bethel, J. (2010), Detection and robust estimation of cylinder features in point clouds, *ASPRS 2010 Annual Conference*, 26-30 April, San Diego, CA, pp. 887-893.

Tran, T.T., Cao, V.T., and Laurendeau, D. (2015), Extraction of cylinders and estimation of their parameters from point clouds, *Computers & Graphics*, Vol. 46, No. 3, pp. 345-357.

Vosselman, G. (2000), Slope-based filtering of laser altimetry data, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 33, No. B3, pp. 935-942.

Wang, J. and Shan, J. (2009), Segmentation of LiDAR point clouds for building extraction, *ASPRS Annual Conference*, Baltimore, Maryland, 9- 13 March, unpaginated CD-ROM.

Wie, G.J., Lee, H., Lee, D.H., Choi, J.M., and Suh, Y.C. (2011), Estimation of the carbon absorption of a forest using LiDAR data, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 29, No. 1, pp. 55-62. (in Korean with English abstract)

Yoo, E., Kim, S., and Lee, D.C. (2014), Accuracy assessment of building modeling with airborne LiDAR data using total least-squares, *Proceedings of International Symposium on Remote Sensing 2014*, 16-18 April, Busan, Korea, unpaginated CD-ROM.

Yoo, E., Park, S., Yom, J.H., and Lee, D.C. (2013), Correction of erroneous model key points extracted from segmented laser scanner data and accuracy evaluation, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 31, No. 6-2, pp. 611-623.